

## 3次元スキャナと斜光線による壁画の表面凹凸の比較

安藤明珠\*

### Comparison of Surface Roughness between Oblique Light and 3D Digitizer Range5

Mitsumi Ando\*

To record and research the surface roughness of the mural paintings, oblique light was used. In our project, we use not only oblique light but also 3D laser scanner. In this paper, we compare these two approach and see the difference in vision.

**Key Words:** surface roughness, oblique light, 3D digitizer, resolution, accuracy

**キーワード:** 表面凹凸, 斜光線, 3D デジタイザ, 分解能, 精度

#### 1. 壁画面の凹凸が語るもの

##### 1.1 壁面の凹凸

私たちが教会などで目にする壁画の表面は決して平坦な漆喰面ではなく、近づいてよく観察すれば、壁画面にはさまざまな要因で生じた大小の凹凸や亀裂が見えてくる。しかし、美術館に展示されたタブロー画（いわゆる額縁に入った絵画作品）と違って、教会などの壁に描かれているスケールの大きな壁画に対しては、ふつう近接距離から見ることはしないものである。また、印刷された画集では、たとえディテールを拡大して印刷してあっても、編集者は色の再現性を最優先するので、正面から光ムラのないフラットな照明で撮影した写真が掲載される。もちろん、そこには見る側の「絵は平面である」という先入観も大きく作用していることだろうが、描写法や保存科学に関心のある者しか、一般には画面の微妙な凹凸に注意を払うことはない。

Fig.1 は、パドヴァのスクロヴェーニ礼拝堂に描かれたジョットのフレスコ壁画（1305 - 10）に散乱（正常）光と斜光を照射して撮影した写真である。壁画面に対して正面から散乱光を照射した場合、中央の聖人に対しては光ムラがなく、鮮やかな色合いを見ることが出来る。一方、壁画に対して右側から浅い角度で光を斜めに照射した場合、壁面の凹凸は濃い影をつくって誇張されるため、円光の漆喰盛り上げ（ストゥッコ）や円光の中心から放射状に刻まれた溝、肌の描写で絵具を塗り重ねた際の筆跡（刷毛目/タッチ）、描画層などの剥離の状態までが、まるで浮き彫りのように驚くほどはっきりと見える。

さらに論を進める前に、壁画の調査や実証研究で、壁面に照

射する光線の光源やライトについて最低限の説明を述べておく。実は、従来の写真撮影の場合でも同様の事態が起こっていたわけだが、一般に照明機器の光源は発熱するため、とくに長時間の写真撮影や調査では壁画面に大きなダメージを与えてしまう。各種の光線照射による調査は「破壊調査」に分類されているものではないが、照明機器については十分に注意しなくてはならない。



Fig. 1 斜光線(左)と散乱光(右)での見え方の違い  
(パドヴァのスクロヴェーニ礼拝堂)

かつてはハロゲンランプを光源として、光をガラスファイバー管の中を通すことによって熱を除去し、完全に「クールな光」として利用するケンコー社のテクノライトなどが顕微鏡の反射ミラーにあてる照明、美術館の展示用ライトなどの用途とともに広く利用されていたが、LEDライトの登場によって「クールな光」がごく簡単に利用できるようになった。近い将来は有機EL照明の導入も検討されることになるであろう。新たな照明の導入に連動して、デジタルデータとして扱うことになる彩色の色補正(色の再現性)も大きな問題として浮上してきているが、それは別の機会に論じる。

\* 金沢大学フレスコ壁画研究センター

\* Research Center of Italian Mural Paintings

## 1.2 壁画面の凹凸を記録することの重要性

壁画面の正確な状態、つまり凹凸を調査・分析することは、歴史的文化遺産としての壁面の保存（健康）状態を診断することであるが、単に保存科学の観点のみならず、美術史研究に対しても文献研究では解決できない新たな研究の展望を拓く新知見となることなどを、以下に整理して確認しておきたい。

### (1) 壁面表面の記録

時間の経過とともに劣化していく有形の文化遺産に対しては、修復や保存処置の介入を講じる前に、まずは可能な限り正確な現状記録が必要であることは言うまでもない。建造物の壁面に描かれた壁画もまた有形文化遺産の典型なので、建造物を含めた壁画面の徹底した現状記録が重要である。その現状記録は単なる画面の写真撮影だけではない。支持体である壁あるいは漆喰層や描画層の3次元的な凹凸データを分析することで、壁画の劣化の状態ないしは健康状態を内部の状態から推測し、どのような修復・保存の処置がベストであるかを検討することができるのである。

さらに、この壁画面の凹凸を3次元で記録したデータは、仮に現物が一般公開に堪えられないレベルまで劣化したり、何らかの不幸な事態によって破壊されたりするようなことが生じて、原寸大写真による複製画とはまさに別次元の正確さでレプリカの作成を可能にする。

### (2) 技法の解明

壁面表面の凹凸の中には、ひび割れや亀裂、剥落などの漆喰壁自体の劣化が原因で生じたもののほかに、上塗り漆喰を塗った際の鰻跡や描写の際の筆跡（刷毛目/タッチ）、さらには顔料の粒子の大きさなど、壁画制作の現場を彷彿とさせる証拠を提示しているものもある。壁画表面の凹凸情報から推測される技法や材料を、原寸大の模写制作によって得られたサンプルデータと比較して分析研究することで、当時の壁画制作の技法や材料がどのようなものであったかを解明することが可能となる。

### (3) 作者の同定

フレスコ画とは漆喰を壁面に塗り、それが乾くまでの8時間程度の短い時間内に、膠や卵黄などの接着剤 / 媒材を加えずに、水だけで溶いた絵具で絵を仕上げなければならない技法である。また、もともと壁画制作の技法として開発されたわけで教会堂内や礼拝堂内の広い面積の壁面に絵を描く場合が多いことから、美術史では1人の画家の手に帰されている作品でも、実際の制作には1人ではなく同じ工房の弟子や助手のほか、他工房からも画家が協力関与することが普通であった。

工房の親方である師から弟子へと受け継がれる技法の系統（特徴）は、工房によって異なるため、壁画面の凹凸から読み取れる（技法に関する推測される）計測データを分析、あるいは統計的に類推することで、壁画制作に関わった画家や工房をこれまで以上に個別的かつ客観的根拠にしたがって特定できる可能性が出てきた。

## 1.3 壁面凹凸を記録する2つの方法

これまでは浅い角度で光を斜めに照射（斜光線）することで、壁面の凹凸を撮影・記録してきた。しかし、最近では3次元計測機器によって、対象物の立体形状をそのままパソコンのモニ

ター上に映し出し、数量的に分析することも可能になった。本センターは南イタリアの洞窟教会に描かれた中世壁画群診断調査プロジェクトの実施において、壁面凹凸を記録する手段として、従来の斜光線照射と3次元計測機器（Konica Minolta 社製 Range5）による2つの計測手法を併せて採用した。本章では、これら2種のまったく異なる計測方法によって得られた画像データを比較し、その見え方の特徴を確認してみる。

## 2. 斜光線による写真撮影

### 2.1 方法

Fig.2は、サン・ヴィート・デイ・ノルマンニにある洞窟教会のサン・ジョヴァンニ教会で斜光線を照射し、壁面を調査しているところである。一般に壁画の描かれている洞窟教会内はわずかな外光が射し込むだけで薄暗いため、懐中電灯の光を壁面に対して斜めに照射するだけでも、簡単に壁面の凹凸を浮かび上がらせることができる。本センターの現地調査ではLEDライトの角度を変えて斜光線を照射し、浮かび上がった壁面の凹凸を、Fig.3のように三脚に固定した4000万画素の高精細デジタルカメラ（PENTAX 645D）で撮影し、記録写真とした。



Fig.2 懐中電灯で斜光線を照射しての壁面調査

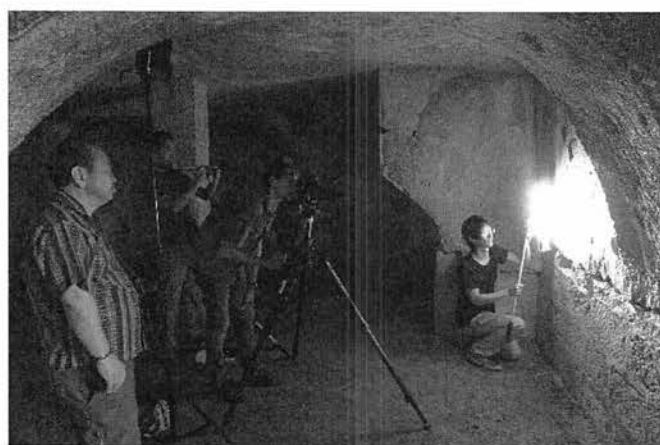


Fig.3 斜光線を照射しながらの写真撮影

このように撮影方法を記述すると、斜光線による写真撮影が壁面凹凸を観察し記録するもっとも手軽な方法であるように思えるかもしれない。しかし、教会や礼拝堂内などに射し込んで

くる外光によっては壁画面が明る過ぎ、調査用に照射する斜光線の効果が充分に出ないこともある。このような場合は、夜間に撮影を行うか、暗幕で堂内に射し込んでくる外光を完全に遮光して撮影しなければならない。たとえば、昨年度の調査地グラヴィーナ・ディ・リッジョ東教会の場合には、洞窟教会の正面ファサードの全面が完全に崩落してしまっていたので、暗幕張りに苦労した (Fig.4)。

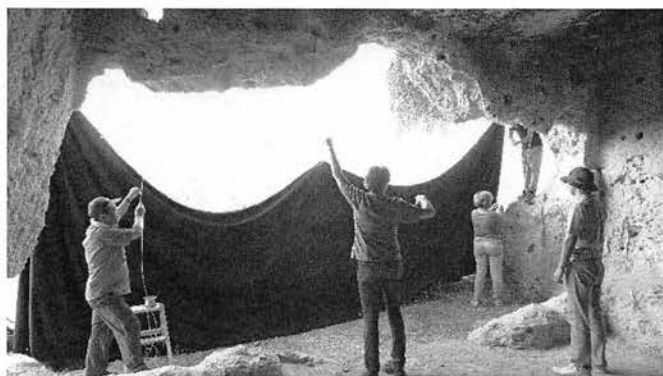


Fig.4 暗幕を張って外光を遮断

また、高所に描かれた壁画を上方から照射しなければならないような場合にも、簡易的な足場を設けるなどの工夫が必要であったり、壁画に接触しないように照明具を慎重に保持する必要があったりした。

## 2.2 見え方

Color Fig.1 は、サン・ジョ・ヴァンニ教会の内陣障壁に描かれている「大天使ミカエル」を左から斜光ライティングして撮影した写真である。ただし、色彩が鮮明でないのは斜光線による照明だからではなく、壁体内部から壁画表面に染み出てきた微細な塩の結晶によって壁画の色彩は薄いヴェールを透かしたように白っちゃけてみえる。予備調査で最初に訪れた際、所有者のジャンニ・ヴィーヴァ氏が大型噴霧器で表面を濡らしてくれたが、とたんに鮮やかな色彩が画面に現れたことを今も鮮烈に記憶している。

いずれにしても斜光線の照射は色彩の観察・記録が目的ではないので、ここでは斜光線によって浮かび上がった壁画面の凹凸から何が読み取れるかという点に注目したい。実際の研究では、本稿に掲載した写真を読み取るのではなく、前述のように4000万画素の高精細画像をピクセル等倍までモニター上に拡大して、壁面上の凹凸が物語るところを読み取るわけである。

そうすると、「大天使ミカエル」を囲む枠線の基準となる水平線や垂直線の墨縄を打った痕跡 (縄目の筋) や、漆喰を塗った際のあまり大きくはない罫の跡、おそらく豚毛のような剛毛筆で彩色したらしい筆跡 (タッチ) が鮮明に見えてくる。豪華な衣装の模様としてスパンコールのように飾られた白いドットは、ねっとりとした石灰クリームの白を筆先からたらし込むようにして点々と置いていった技法であることもわかる。もちろん、壁面の剥離、剥落、亀裂、欠損などの状態も鮮明に観察できる。

## 2.3 問題点

照射の角度や方向を変えることで壁面は新たな様相を呈する。つまり、一方向の照射では見えなかった状態が照射の方向や角度を変えることで見えてくるのである。したがって、同一の壁面でも可能な限り照射の角度や方向を変えながら、調査と撮影を進めていくことになる。しかし、斜光線調査の問題は1回の照射で調査が完結しないというような問題ではない。斜光線による調査でもっとも問題となるのは、斜光線で見えている凹凸の程度が光線の照射角度によって変わる影の長さによるものであり、実際の凹凸を定量的に計測ないしは記録することができないという点である。

つまり、斜光線の照射で浮かび上がる壁面の凹凸は、光線の入射角度に応じて生じる影が見かけ上の増幅作用によって、実際以上に凹凸を誇張して見せているということである。凹凸を定量化しなければならない場合を除いては、斜光によって生じる影の増幅作用はインパクトのある視覚情報として有益であるが、それが常に客観ではなく、「偏見」と「誇張」であることを忘れてはならない。

ここで言う「偏見」とは一方的な見え方を意味する。たとえば、Color Fig.3 と Fig.4 は同一壁画面 (サン・ジョ・ヴァンニ教会の中央後陣に描かれている「デエシス」) に対して光線の照射角を反対にしたものである。Color Fig.3 は左から、Color Fig.4 は右から照射している。中央に描かれているキリストが左手に持つ聖書のあたりには、大きく抉られたような欠損部分があるが、これがどのような形に抉られた欠損部分であるかを写真から読み取り取ろうとしても、これら2枚の写真から判断される形状はそれぞれにまったく異なるものである。Color Fig.3 では欠損部は大きく、Color Fig.4 では黒い影をつくっている縦長の欠損部の左側は壁面が凸状に盛り上がって見える。

しかし、時として斜光線が生む陰影画像は、人間の目に凹凸の逆転現象となって現れる。陰影が作る1つの形が、ある者の目には凸状形態に見え、ある者には凹状形態に見える現象であるが、1人の人間の目に見える形態も、ふとしたことで凹凸が即座に逆転してしまう。この陰影による視覚の凹凸逆転現象モデルを図解してみれば、その要因がはっきりする (Fig.5 & 6)。

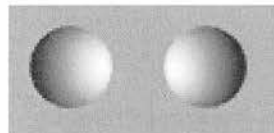


Fig.5 陰影による凹凸の見え方

(右から斜光線を照射したとすると、左側は凸状、右側は凹状に見える。逆に左から照射したとすると、左側が凹状、右側が凸状に見える。)

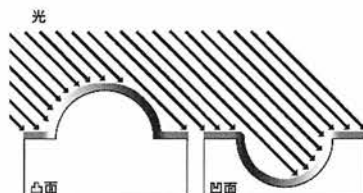


Fig.6 左から斜光線を照射した場合の陰影のつき方 (光線が多く当たるほど明るく見える)



### 3. Range5による3次元計測

#### 3.1 方法

本センターが使っている3次元計測機器はKonica Minolta社製Range5であり、レーザ光線を走査させることで8ミクロン(=0.008mm)の精度で壁面の凹凸を計測することができる。実際の壁画調査では、主として異なる年代の壁画の重層性が顕著な箇所、壁画面に施された凹凸のある装飾箇所(たとえば漆喰を盛り上げたレリーフ状の円光)、ズグラフフィート(刻線描写)、鏝跡や筆跡、フレスコ画におけるジョルナータの継ぎ目などを調査し、正確かつ定量的に記録しようとする場合である。

#### 3.2 見え方

点の集合体としての3次元計測であるから、(そこに写真データを貼り合わせない限り)画像としての色データはない。専用ソフトを利用して3次元座標内でデータを自由に動かし、最も効果的と思われる位置で凹凸を確認することが可能であるほか、個々の凹凸を計測して高い精度で定量化することも、当然ながら可能である(Color Fig.2)。

#### 3.3 問題点

広い壁画面全体を短時間でスキャンしなければならないような場合には、ほぼ25cm四方のスキャン面を移動して計測し、あとでそれらのデータを継ぎ合わせる必要があるが、上記のような特定箇所に限定して測定する場合には問題はない。

ただし、Range5はコントラストの強い描線を凹凸面として誤認識してしまう問題点が未だ完全には払拭されていないので、写真画像と照合することが必要である。とはいえ、本センターが目指す壁画調査の目的を十分に果たすスペックを備えた機種であると言うことができる。

### 4. 斜光線とRange5の比較

#### 4.1 それぞれの特徴を生かして

斜光線照射による観察調査にも3次元計測機器のRange5を利用したデジタル計測調査にも、それぞれメリットとデメリットがあることは上述の通りだが、それを以下に整理してみる。

##### 【斜光線】

メリット:

- ①小型のLEDライトで観察調査が可能。
- ②照射の角度や方向を変えて凹凸を強調させ、自由に壁面の状態を確認できる。

デメリット:

- ①見えている(あるいは写真に記録されている)壁画面の凹凸状態は客観的に定量化できるものではなく、あくまでも誇張されたものである。
- ②撮影に関して、画角の中で露出が大きく違うのでカメラの露出設定を数段階に替えて撮影する必要がある。
- ③人の目の見え方によって壁面の凹凸が逆転して見えてしまう。→対策として、日常的に見慣れているもの(たとえば鉛筆)を斜光線で壁面を撮影する際にいっしょに写し込むことで、凹凸の見え方の逆転(反転現象)は抑えられるようだ(Fig.7)。



Fig.7 画角の中に鉛筆を写し込んで斜光線撮影したもの

##### 【Range5】

メリット:

- ①高精度の3次元計測データの応用範囲は広い。3Dプリンタを利用すれば、壁面の凹凸を正確に再現することも可能である。
- ②座標上の2点間の距離を測定することで、凹凸を定量化することができる。
- ③壁面の凹凸が人の目の見え方によって逆転してしまう現象は、データを座標軸上で回転させて確認することで解決できる。

デメリット:

- ①小型化されているとはいえ高価な精密機器であり、きわめて慎重な管理(輸送や移動)や取り扱いが要求される。
- ②稼働させるための電源(フィールド調査ではリチウムバッテリーを使用)が必要である。
- ③写真画像データをもたないため、別に撮影した写真データを貼り合わせなければ、実際の画像を視覚的に認識することが難しい。

#### 4.2 比較上の問題

斜光線照射で鮮明に浮かび上がってくる筆跡(刷毛目)部分をRange5で計測した3Dデータで見ると、エッジが丸く面取りされてしまって見えにくい。

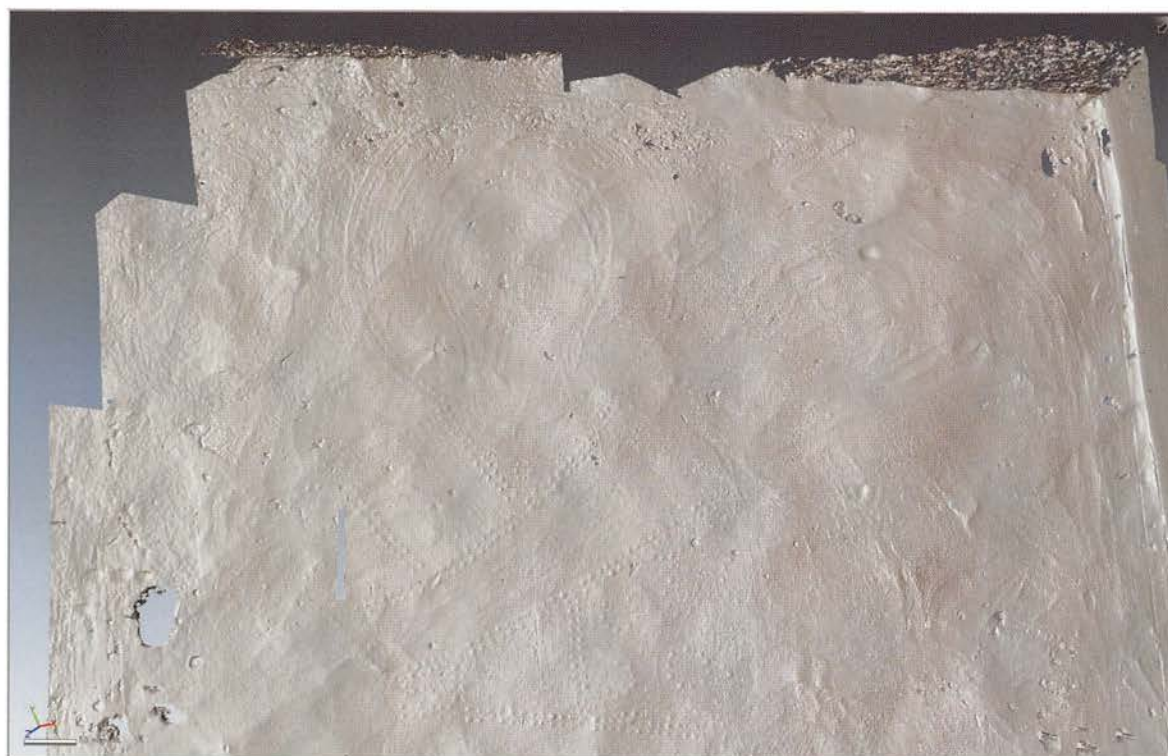
その原因はおそらく、Range5で計測したデータの場合には、点を面に変換する際に筆跡(刷毛目)などの線描的凹凸が鋭角さを失ってしまうのではないかと考えられる。Color Fig.1とColor Fig.2は、サン・ジョヴァンニ教会に描かれている「大天使ミカエル」の円光を含めた頭部の《斜光線による写真》と《Range5による3Dデータ写真》である。両者の筆跡(刷毛目)を比較すれば、それは一目瞭然である。

剛毛筆で描かれたと思われるが、今、豚毛などの毛の太さが不明なので、日本人の平均的毛髪の太さを参考にすれば、1本の毛の太さは0.08mmで、Range5の精度8ミクロン=0.008mmからすれば確実に計測できていなければおかしい。このことから、点で記録したデータを面に変換する際に「見かけ上」の鋭角さを失ったのではないかと推測する。

サン・ジョヴァンニ教会の内陣障壁に描かれている「大天使ミカエル」

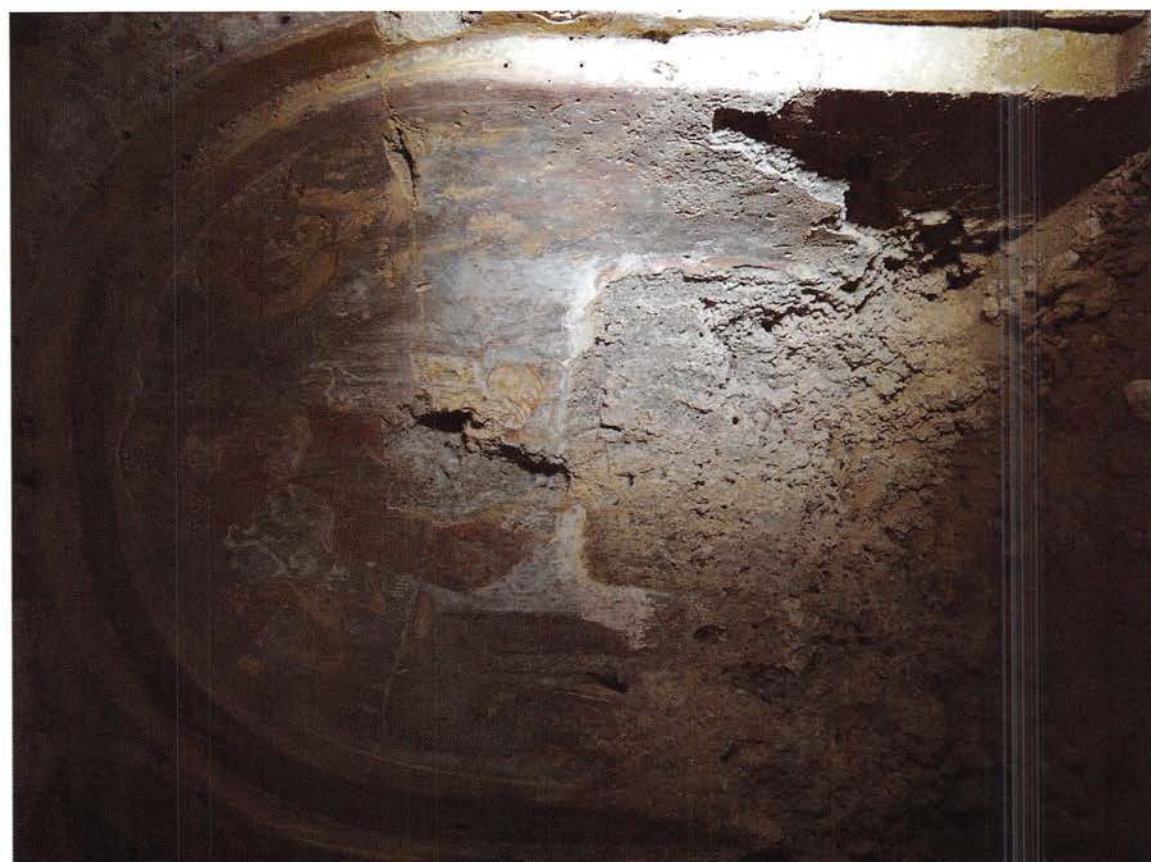


Color Fig.1 斜光線を照射して撮影した壁面凹凸

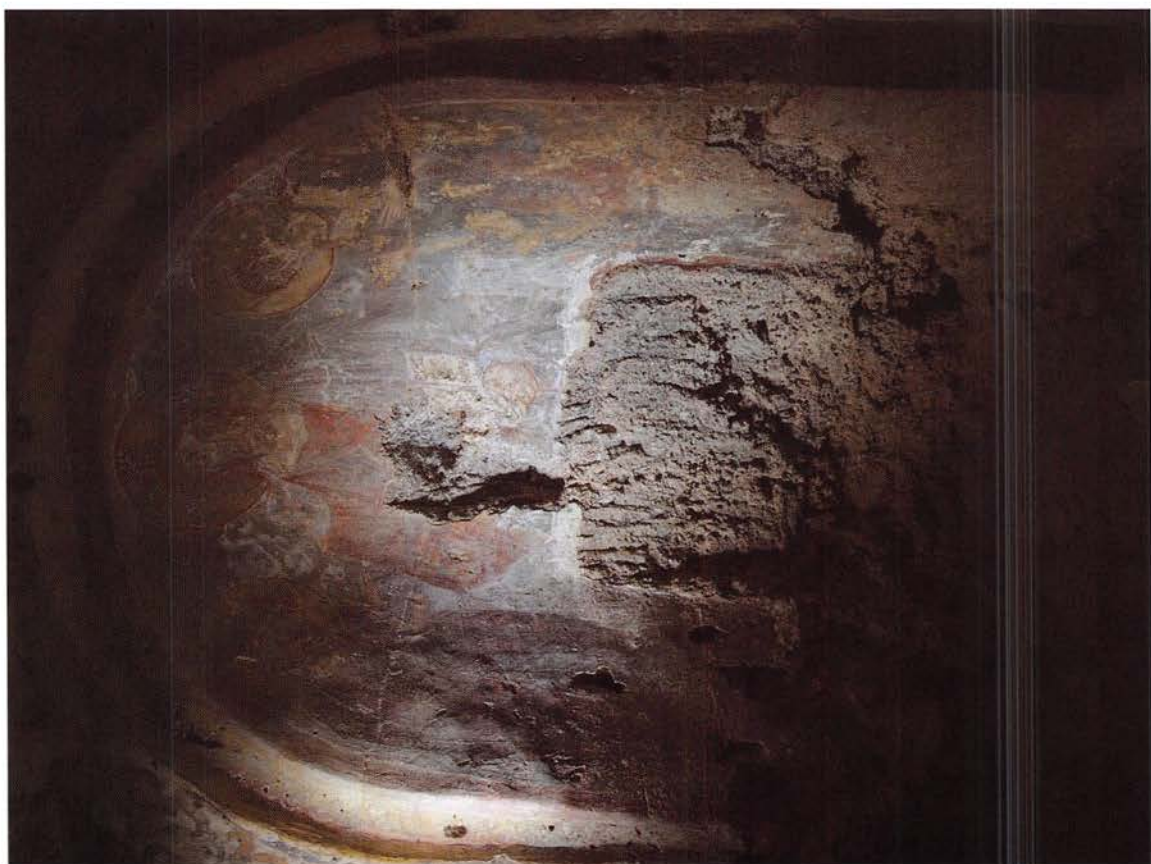


Color Fig.2 3次元レーザスキャナ(Range5)で計測した壁面凹凸





Color Fig.3 右から斜光線を照射した壁面



Color Fig.4 左から斜光線を照射した壁面

サン・ジョヴァンニ教会の中央後陣に描かれている「デエシス」